التوصيـــة ITU-R P.834-6*

آثار الانكسار التروبوسفيري على انتشار الموجات الراديوية

(المسألة ITU-R 201/3)

(2007-2005-2003-1999-1997-1994-1992)

مجال التطبيق

تقدم التوصية ITU-R P.834 طرائق حساب آثار الانكسار واسعة النطاق في الجو، بما في ذلك انحناء الشعاع وطبقات التوصيل ونصف قطر الأرض الفعال وزاوية الارتفاع الظاهري وزاوية التسديد للمسارات أرض–فضاء والطول الفعّال للمسير الراديوي.

إن جمعية الاتصالات الراديوية للاتحاد الدولي للاتصالات،

إذ تضع في اعتبارها

أ) أن التخطيط الملائم لوصلات الأرض والوصلات أرض–فضاء مرهون بتوفر إجراءات حساب مناسبة لتقييم آثار الانكسارية على الإشارات الراديوية؛

ب) أن إجراءات طورت لحساب بعض آثار الانتشار الانكساري على الإشارات الراديوية على وصلات الأرض والوصلات أرض–فضاء،

توصـــي

1 باستعمال المعلومات الواردة في الملحق 1 لحساب آثار الانكسار واسعة النطاق.

الملحـــق 1

1 انحناء الأشعة

ينحني شعاع راديوي يعبر المنطقة الدنيا (غير المتأينة) للجو بوجود تدرج لمؤشر الانكسار. وبما أن مؤشر الانكسار يتغير أساساً مع الارتفاع، ففي معظم الحالات لا يُؤخذ في الاعتبار سوى التدرج العمودي لمؤشر الانكسار. وعندئذ يكون الانحناء عند نقطة ما متضمناً في المستوي العمودي ويُعبر عنه بواسطة:

$$\frac{1}{\rho} = \frac{\cos\varphi}{n}\,\frac{\mathrm{d}n}{\mathrm{d}h} \qquad (1)$$

* أدخلت لجنة الدراسات 3 للاتصالات الراديوية تعديلات صياغية على هذه التوصية عام 2009 طبقاً للقرار ITU-R 1.

حيث:

ρ: نصف قطر انحناء مسير الشعاع

n: مؤشر الانكسار الجوي

dn/dh: التدرج العمودي لمؤشر الانكسار

h: ارتفاع النقطة فوق سطح الأرض

φ: زاوية مسير الشعاع مع المستوي الأفقي عند النقطة قيد النظر.

يُحدد انحناء الأشعة على أنه موجب عندما يكون تقعره موجهاً نحو سطح الأرض. ولا تتوقف هذه الظاهرة عملياً على التردد وحده إذا كان تدرج المؤشر لا يتغير بكيفية مهمة على مسافة تساوي طول الموجة.

2 نصف قطر الأرض الفعّال

إذا كان المسير أفقياً تقريباً، تكون φ قريبة من صفر. ولكن، بما أن n قريبة جداً من 1، فإن المعادلة (1) تُبسط على النحو التالي:

$$\frac{1}{\rho} = -\frac{dn}{dh} \tag{2}$$

لذلك فمن الواضح أنه إذا كان التدرج العمودي ثابتاً، فإن المسيرات تكون أقواس دائرة.

وإذا كان المظهر الجانبي للانكسارية بالاستناد إلى الارتفاع خطياً، أي تدرج الانكسارية ثابت على طول مسير الشعاع، يمكن حدوث تحول يسمح باعتبار الانتشار مستقيماً. ويشكل التحول دراسة أرض افتراضية ذات نصف قطر فعال $R_e = k\,a$، معبراً عنه بواسطة:

$$\frac{1}{ka} = \frac{1}{a} + \frac{dn}{dh} = \frac{1}{R_e} \tag{3}$$

حيث a تدل على نصف قطر الأرض الحقيقي، وحيث k هو عامل نصف قطر الأرض الفعال (عامل k). ومع هذا التحول الهندسي، تكون مسارات الشعاع خطية بمعزل عن زاوية الارتفاع.

وبدرجة أكبر من الدقة، لا يكون تدرج الانكسارية ثابتاً إلا إذا كان المسير أفقياً. وفي الواقع العملي يمكن أن يمثل النموذج الأسي للمظهر الجانبي لمؤشر الانكسار الوسطي (انظر التوصية رقم ITU-R P.453) – بالنسبة للارتفاعات التي تقل عن 1 000 متر – بشكل تقريبي عن طريق نموذج خطي. ويكون العامل k المقابل هو $k = 4/3$.

3 مؤشر الانكسار المعدّل

بالنسبة لبعض التطبيقات، مثلاً فيما يخص ترسيم الشعاع، يُستعمل مؤشر انكسار معدل أو وحدة انكسار معرّفة في التوصية ITU-R P.310. وتُعطى وحدة الانكسار M بواسطة:

$$M = N + \frac{h}{a} \tag{4}$$

حيث h ارتفاع النقطة المعنية معبراً عنه بالأمتار وa نصف قطر الأرض معبراً عنه بآلاف الكيلومترات. ويسمح هذا التحويل بالرجوع إلى الانتشار فوق سطح أرض منبسطة يعلوها جو تعادل انكساريتها فيه وحدة الانكسار M.

4 زاوية نقطة التسديد الظاهرية على المسيرات المائلة

1.4 مقدمة

في دراسات التقاسم، من الضروري تقييم زاوية الارتفاع الظاهرية لمحطة فضائية تأخذ الانكسار الجوي في الحسبان. وتُعطى فيما يلي طريقة حساب مناسبة.

2.4 رؤية المحطة الفضائية

كما هو موصوف في الفقرة 1 أعلاه، فإن حزمة راديوية مرسلة من محطة على سطح الأرض (ارتفاع h (km) وزاوية ارتفاع θ (بالدرجات)) تُحنى نحو الأرض نظراً لأثر الانكسار الجوي. ويمكن تقييم تصحيح الانكسار، τ (بالدرجات)، بواسطة التكامل التالي:

$$\tau = -\int_h^\infty \frac{n'(x)}{n(x) \cdot \tan\varphi} \, dx \tag{5}$$

حيث تحدد φ على النحو التالي على أساس قانون سنيل (Snell) بإحداثيات قطبية:

$$\cos\varphi = \frac{c}{(r + x) \cdot n(x)} \tag{6}$$

$$c = (r + h) \cdot n(h) \cdot \cos\theta \tag{7}$$

r: نصف قطر الأرض (6 370 km)

x: الارتفاع (km).

وبما أن انحناء الشعاع يتوقف إلى حد كبير على الجزء المحدد بواسطة الجزء الأدنى للجو، يمكن حساب مؤشر الانكسار لجو نمطي عند ارتفاع x انطلاقاً من المعاملات التالية:

$$n(x) = 1 + a \cdot \exp(-bx) \tag{8}$$

حيث:

$$a = 0{,}000315$$

$$b = 0{,}1361.$$

ويقوم هذا النموذج على النموذج الجوي الأسّي المعرف في التوصية ITU-R P.453 لانتشار الأرض. وإضافة إلى ذلك فإن $n'(x)$ مشتقة من $n(x)$، أي $n'(x) = -a\,b \exp(-bx)$.

وقد تم تقييم $\tau(h, \theta)$ (بالدرجات) بافتراض الجو المرجعي؛ ويبدو أن الصيغة الرقمية التالية تعطي تقريباً جيداً:

$$\tau(h, \theta) = 1/[1.314 + 0.6437\,\theta + 0.02869\,\theta^2 + h\,(0.2305 + 0.09428\,\theta + 0.01096\,\theta^2) + 0.008583\,h^2] \tag{9}$$

وتم الحصول على هذا التقريب من أجل ($0 \le h \le 3$ km) و($\theta_m \le \theta \le 10°$)، حيث θ_m، الزاوية التي تُعترض فقط عندها الحزمة الراديوية بواسطة سطح الأرض، وتُعطى بواسطة:

$$\theta_m = -\arccos\left(\frac{r}{r + h} \cdot \frac{n(0)}{n(h)}\right) \tag{10}$$

أو، بالتقريب، $\theta_m = -0{,}875\sqrt{h}$ (بالدرجات).

وتعطي المعادلة (9) كذلك تقريباً معقولاً من أجل ($10° < \theta \le 90°$).

ولتكن θ_0 (بالدرجات) هي زاوية ارتفاع محطة فضائية في ظروف الانتشار في الفضاء الحر ولتكن θ_m زاوية الارتفاع الدنيا لمحطة عند سطح الأرض لا يعترض فيها سطح الأرض لحزمتها الراديوية. ويكون حد تصحيح الانكسار المقابل لقيمة θ_m هو $\tau(h, \theta_m)$. وبذا لا تكون المحطة الفضائية مرئية إلا عندما يكون عدم التساوي التالي صحيحاً:

$$\theta_m - \tau(h, \theta_m) \leq \theta_0 \quad (11)$$

3.4 تقييم زاوية الارتفاع الظاهرية

عندما يكون عدم التساوي (11) صحيحاً، يمكن حساب زاوية الارتفاع الظاهرية، θ (بالدرجات)، التي تأخذ الانكسار الجوي في الاعتبار، مع حل المعادلة التالية:

$$\theta - \tau(h, \theta) = \theta_0 \quad (12)$$

ويكون حل المعادلة (12) كما يلي:

$$\theta = \theta_0 + \tau_s(h, \theta_0) \quad (13)$$

حيث قيم $\tau_s(h, \theta_0)$ شبيهة بقيم $\tau(h, \theta)$، لكن يُعبر عنها كدالة لقيمة θ_0.

وتعطي الصيغة الرقمية التالية تقريباً جيداً للدالة $\tau_s(h, \theta_0)$ (بالدرجات):

$$\tau_s(h, \theta_0) = 1/[1.728 + 0.5411\,\theta_0 + 0.03723\,\theta_0^2 + h(0.1815 + 0.06272\,\theta_0 + 0.01380\,\theta_0^2) + h^2(0.01727 + 0.008288\,\theta_0)] \quad (14)$$

وقيمة θ المحسوبة بواسطة المعادلة (13) هي زاوية الارتفاع الظاهرية.

4.4 تلخيص عمليات الحساب

المرحلة 1: زاوية ارتفاع محطة فضائية في ظروف الانتشار في الفضاء الحر يُشار إليها بواسطة θ_0.

المرحلة 2: باستعمال المعادلتين (9) و(10)، نتفحص ما إذا كان عدم التساوي (11) صحيحاً. وإذا لم يكن الأمر كذلك، فإن الساتل ليس مرئياً وينتج عن ذلك عدم ضرورة أي حساب آخر.

المرحلة 3: إذا كان عدم التساوي (11) صحيحاً، تُحسب θ بواسطة المعادلتين (13) و(14).

5.4 النتائج المقيسة لزاوية التسديد الظاهرية

يقدم الجدول 1 قيماً متوسطة للانحراف الزاوي للانتشار عبر الجو بكامله. ويعطي تلخيصاً للمعطيات التجريبية المحصل عليها بواسطة تقنيات الرادار وبواسطة مقياس إشعاع تلسكوب راديوي. ونلاحظ تقلبات لزاوية الارتفاع الظاهرية بسبب التغيرات المحلية لبنية مؤشر الانكسار.

الجـــدول 1

قيم الانحراف الزاوي للانتشار عبر الجو بكامله

زاوية الارتفاع، θ (بالدرجات)	متوسط الانحراف الزاوي الإجمالي، $\Delta\theta$ (بالدرجات)			
	هواء قاري قطبي	هواء قاري معتدل	هواء بحري معتدل	هواء بحري استوائي
1	0,45	–	–	0,65
2	0,32	0,36	0,38	0,47
4	0,21	0,25	0,26	0,27
10	0,10	0,11	0,12	0,14
20		0,05	0,06	
30		0,03	0,04	
	التغيرات اليومية في $\Delta\theta$ (للعمودين 1 و4 فقط)			
1	0,1 جذر متوسط التربيع			
10	0,007 جذر متوسط التربيع			

5 التبئير وإزالة التبئير لانتشار الموجة في الجو

قد تنتج التغيرات في سوية الإشارات أيضاً عن تمديد أو تضييق حزمة الهوائي الناجمين عن تغيرات الانكسار الجوي وزاوية الارتفاع. وينبغي إهمال هذه الآثار فيما يتعلق بزوايا الارتفاع فوق 3°.

وتستخدم المعادلة المبينة أدناه في حساب خسارة الإشارة أو كسبها الناجمين عن آثار الانكسار في الموجة تمر عبر الجو الكلي:

$$b = \pm 10 \log(B)$$

حيث:

$$B = 1 - \frac{0.5411 + 0.07446\theta_0 + h(0.06272 + 0.0276\theta_0) + h^2 0.08288}{\left[1.728 + 0.5411\theta_0 + 0.03723\theta_0^2 + h\left(0.1815 + 0.06272\theta_0 + 0.0138\theta_0^2\right) + h^2(0.01727 + 0.008288\theta_0)\right]^2}$$

θ_0: زاوية ارتفاع الخط الواصل بين نقطتي الإرسال والاستقبال، مقدرة بالدرجات ($\theta_0 < 10°$)

h: ارتفاع أدنى نقطة عن مستوى سطح البحر، مقدراً بالكيلومترات ($h < 3$ km)

b: تغيير في سوية الإشارة فيما يتعلق بالموجة المارة في الجو نسبةً إلى ظروف الانتشار في الفضاء الحر، مقدراً بالديسبل

ستكون العلامة في المعادلة الخاصة بقيمة b سالبة "–" فيما يتعلق بمصدر الإرسال الواقع قرب سطح الأرض، وموجبة "+" فيما يتعلق بالمصدر الواقع خارج محيط الجو.

6 طول المسير الراديوي الفعال وتغيراته

بما أن مؤشر الانكسار التروبوسفيري أعلى من 1 ويتوقف على الارتفاع، فإن طول المسير الراديوي لموجة تنتشر بين الأرض وساتل ما يكون أكبر من طول المسير الهندسي. ويُعطى فارق الطول بواسطة التكامل التالي:

$$\Delta L = \int_A^B (n - 1)\, ds \tag{15}$$

حيث:

s: الطول على مدى المسير

n: مؤشر الانكسار

A وB: طرفا المسير.

ولا يمكن استعمال المعادلة (15) إلا إذا كان تغير مؤشر الانكسار n على طول المسير معروفاً.

عندما تكون درجة الحرارة T والضغط الجوي P والرطوبة النسبية H عند سوية الأرض معروفة، فإننا نحسب فارق طول المسير ΔL حسب الطريقة شبه التجريبية المعبر عنها فيما يلي، والتي وُضِعت انطلاقاً من المنحنيات المحصل عليها بواسطة السبر الراديوي الجوي خلال حملة قياسات عام واحد أُجريت في 500 محطة أرصاد جوية في 1979. في هذه الطريقة، تكون العبارة العامة لفارق طول المسير ΔL هي:

$$\Delta L = \frac{\Delta L_V}{\sin\ \varphi_0 \left(1 + k \cot^2 + \varphi_0\right)^{1/2}} + \delta\left(\varphi_0, \Delta L_V\right) \tag{16}$$

حيث:

φ_0: زاوية الارتفاع عند نقطة الرصد

ΔL_V: فارق طول المسير العمودي

k و$\delta(\varphi_0, \Delta L_V)$: المعلمات التصحيحية التي يُستعمل لحسابها النموذج الجوي الأُسّي.

ويأخذ العامل k في الحسبان تغير زاوية الارتفاع على طول المسير. ويعبر الحد $\delta(\varphi_0, \Delta L_V)$ عن آثار الانكسار (المسير ليس خطاً مستقيماً). ويكون هذا الحد دائماً صغيراً جداً، ما عدا عند زاوية الارتفاع المنخفضة جداً ويُهمل في الحساب؛ وهو ينطوي على خطأ 3,5 cm فقط لزاوية φ_0 ذات 10° و0,1 mm لزاوية φ_0 من 45°. ونلاحظ من جانب آخر أنه عند زوايا ارتفاع صغيرة جداً لن تكون المعلمة δ بالنسبة لها مهملة، فإن افتراض جو مستو في طبقات، وهو أساس كل طرائق حساب فارق طول المسير، لا يبقى صحيحاً.

يُعطى فارق طول المسير العمودي (m) بواسطة المعادلة التالية:

$$\Delta L_V = 0{,}00227\, P + f(T)\, H \tag{17}$$

في الحد الأول من الطرف الأيمن من المعادلة (17)، P هي الضغط الجوي (hPa) عند نقطة الرصد.

في الحد الثاني ذي الطبيعة التجريبية، H هي الرطوبة النسبية (%)؛ تُعطى دلالة درجة الحرارة $f(T)$، التي تتوقف على الموقع الجغرافي، بواسطة المعادلة التالية:

$$f(T) = a\, 10^{bT} \tag{18}$$

حيث:

T يُعبر عنها بواسطة °C

a يُعبر عنها بواسطة m/% للرطوبة النسبية

b يُعبر عنها بواسطة $^{-1}$°C.

وتُعطى في الجدول 2 المعلمتان a وb اللتان تتوقفان على الموقع الجغرافي.

الجـــدول 2

الموقع	a (m/%)	b ($^{-1}$°C)
مناطق ساحلية (جزر أو أماكن تقع على أقل من 10 km من الساحل)	$5{,}5 \times 10^{-4}$	$2{,}91 \times 10^{-2}$
مناطق استوائية غير ساحلية	$6{,}5 \times 10^{-4}$	$2{,}73 \times 10^{-2}$
كل المناطق الأخرى	$7{,}3 \times 10^{-4}$	$2{,}35 \times 10^{-2}$

لحساب العامل التصحيحي k للمعادلة (16)، نفترض تغيراً أسياً بارتفاع h للانكسارية الجوية N:

$$N(h) = N_s \exp(-h / h_0) \tag{19}$$

حيث N_s هي متوسطة قيمة الانكسارية عند سطح الأرض (انظر التوصية ITU-R P.453) وh_0 تُعطى بواسطة:

$$h_0 = 10^6 \frac{\Delta L_V}{N_s} \tag{20}$$

عندها تُحسب k من العبارة التالية:

$$k = 1 - \left[\frac{n_s \, r_s}{n(h_0) \, r(h_o)} \right]^2 \tag{21}$$

حيث n_s و$n(h_0)$ هما قيمتا مؤشر الانكسار عند سطح الأرض وعند الارتفاع h_0 (المعطاة بواسطة المعادلة (20)) على التوالي، وr_s و$r(h_0)$ هما المسافتان المقابلتان لمركز الأرض.

بالنسبة للمسيرات أرض-ساتل مع زاوية ارتفاع θ أكبر من 10°، يمكن التعبير عن فارق الطول الناتج عن الآثار التروبوسفيرية (m) على أنه مجموع "حد جاف" و"حد رطب":

$$\Delta L = \Delta L_{dry} + \Delta L_{wet} = 10^{-6} \frac{R_d}{g_m} \left\{ k_1 \cdot p_s + \frac{k_2}{(\lambda+1)} \cdot \frac{e_s}{T_{ms}} \right\} \cdot \frac{1}{\sin\theta} \quad \text{(m)} \tag{22}$$

حيث:

p_s، e_s: الضغط الكامل للهواء وضغط بخار الماء على سطح الأرض (hPa)

T_{ms}: متوسط درجة حرارة بخار الماء على السطح (K)

λ: عامل انخفاض ضغط البخار

R_d: R/M_d = 287,0 (J/kg K)

R: الثابت الجزيئي الغرامي للغاز = 8,314 (J/mol K)

M_d: الكتلة الجزيئية الغرامية للهواء الجاف = 28,9644 (g/mol)

k_1 = 77,604 (K/hPa)

k_2 = 377600 (K^2/hPa)

$g_m = g(lat, h_s) = 9{,}784 \cdot (1 - 0{,}00266 \cdot \cos(2 \cdot lat) - 0{,}00028 \cdot h_s)$ = تسارع الجاذبية (m/s^2)

lat: خط العرض (بالدرجات)

h_s: ارتفاع المكان فوق سطح البحر (km).

وبالنسبة للمستقبِلات الواقعة على ارتفاع أعلى من متوسط مستوى البحر h (km) مختلف عن ارتفاع السطح h_s، يمكن استقراء قيم معلمات الأرصاد الجوية من قيم السطح، T_{ms} وe_s وp_s عن طريق استخدام المعادلات التالية:

$$\Delta L(h) = \Delta L_{dry}(h) + \Delta L_{wet}(h) = 10^{-6} \frac{R_d}{g_m(h)} \left\{ k_1 \cdot p(h) + \frac{k_2}{(\lambda+1)} \cdot \frac{e(h)}{T_m(h)} \right\} \cdot \frac{1}{\sin\theta} \quad \text{(m)} \tag{23a}$$

$$T_m(h) = T_{ms} - \alpha_m \cdot (h - h_s) \quad \text{K} \tag{23b}$$

$$p(h) = p_s \left[1 - \frac{\alpha(h - h_s)}{T_s} \right]^{\frac{g_m}{R'_d \alpha}} \quad \text{hPa} \tag{23c}$$

$$e(h) = e_s \cdot \left[\frac{p(h)}{p_s} \right]^{\lambda+1} \quad \text{hPa} \tag{23d}$$

حيث:

α_m = معدل هبوط متوسط درجة حرارة بخار الماء (K/km).

$$\alpha \cong 0.5\frac{(\lambda+1)g_m}{R'_d}\left[1-\sqrt{\frac{(\lambda+1)g_m}{R'_d}\left[\frac{(\lambda+1)g_m}{R'_d}-4\alpha_m\right]}\right] \quad \text{(K/km) معدل هبوط متوسط درجة حرارة الهواء =} \quad (23e)$$

$$R'_d = R_d/1\,000 = 0{,}287 \qquad \text{J/g K} \quad (23f)$$

$$T_s = \frac{T_{ms}}{1-\frac{\alpha R'_d}{(\lambda+1)g_m}} \qquad \text{K} \quad (23g)$$

ويمكن استخراج دخل النموذج من خلال الافتراض بأن معلمات الأرصاد الجوية تتميز بتقلب موسمي.

$$X_i(D_y) = a1_i - a2_i\cos\left[2\pi\frac{(D_y - a3_i)}{365{,}25}\right] \quad (24)$$

حيث:

X_i: p_s، e_s، T_{ms}، λ أو αm

$a1_i$: القيمة الوسطية للمعلمة

$a2_i$: التقلب الموسمي للمعلمة

$a3_i$: يوم من القيمة الدنيا للمعلمة

D_y: يوم من السنة (1 ... 365,25)

1 = 1 يناير، 32 = 1 فبراير، 60,25 = 1 مارس.

وقد حُسبت المعامِلات $a1$ و$a2$ و$a3$ من خلال مواءمة النموذج التوافقي مع الإحصاءات الشهرية لمعلمات الأرصاد الجوية المأخوذة من قاعدة المعطيات ECMWF ERA15.

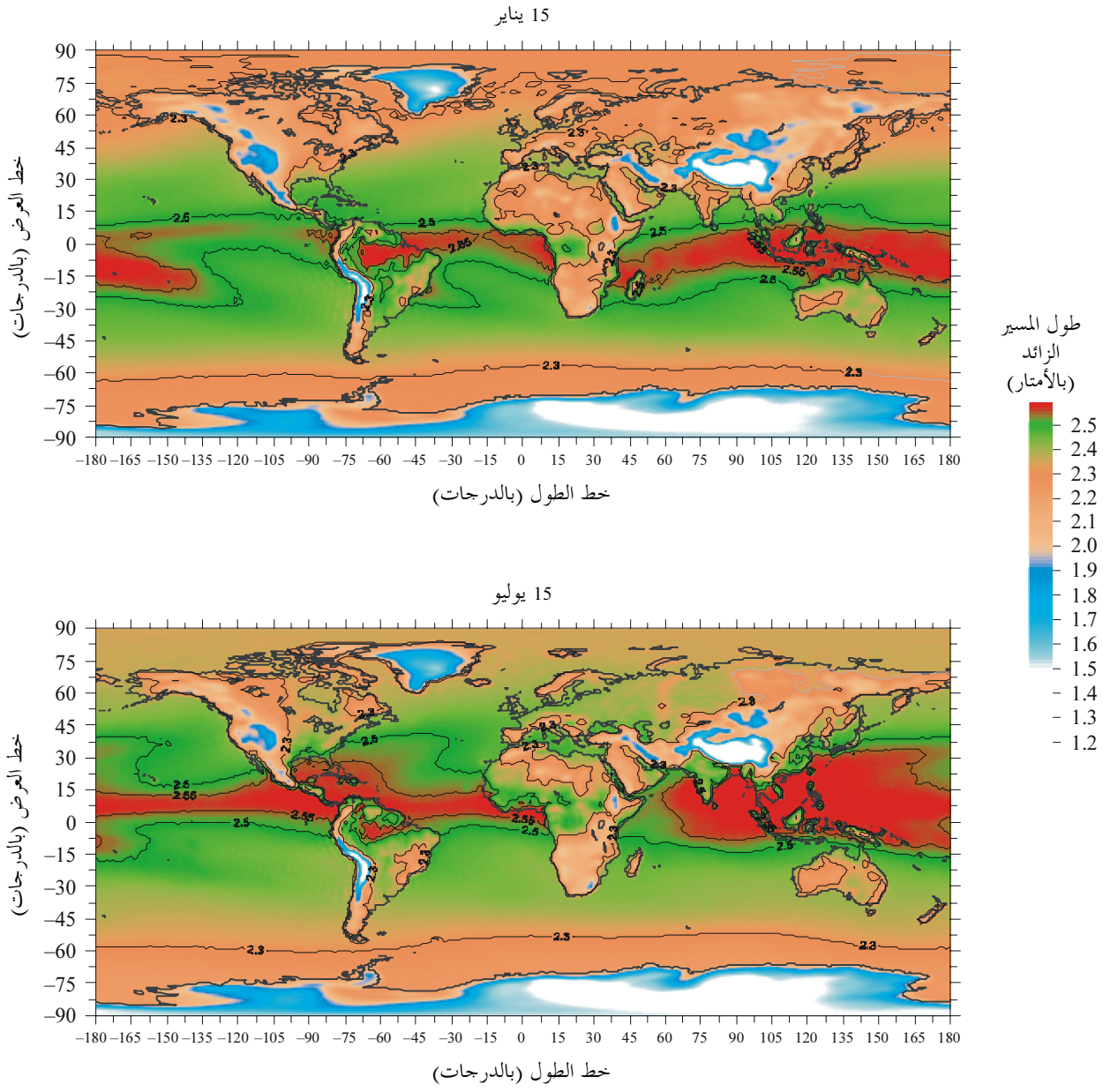
وتوجد قيم معلمات هذا النموذج التوافقي $a1$ و$a2$ و$a3$ لكل معلمة أرصاد جوية في خرائط رقمية يصل مجموعها إلى 15 خريطة مع استبانة بقيمة $1{,}5 \times 1{,}5$ (بالدرجات). وتوجد معامِلات النموذج التوافقي في ملفّات تسمى **<*met_param*>_<*mod_par*>.dat**، حيث **<*met_param*>** هي **press** أو **vapr** أو **tmpm** أو **lamd** أو **alfm** من أجلِ p_s أو e_s أو T_{ms} أو λ أو $m\alpha$ على التوالي، و**<*mod_par*>** هي ***a*1** أو ***a*2** أو ***a*3**. والمعطيات هي من 0 إلى 360 طولانياً ومن +90 إلى −90 عرضانياً مع استبانة بقيمة 1,5° طولانياً وعرضانياً على حد سواء. والإضافات التي تلزم في هذا النموذج هي: **lat.dat** = قيم خط العرض المرجعية (90 ... −90) و**long.dat** = قيم خط الطول المرجعية (0 ... 360) و**hreflev.dat** = متوسط ارتفاع المستوى المرجعي فيما يتصل بمستوى البحر (m).

وبالنسبة لمستقبلٍ موجودٍ في موقع مختلف عن نقاط الشبكة يجب أن تحسب الزيادة في طول المسير عن طريق أداء استكمال ثنائي الخط لطولِ مسير الزيادة عند نقاط الشبكة الأربع الأكثر قرباً والمقدّرة من خلال استخدام نفس ارتفاع المستقبِل.

وقد اختبرت دقة النموذج المقترح عن طريق استخدام المسبار الراديوي وقياسات النظام العالمي لتحديد المواقع (GPS) وكانت النتيجة أنه ضمن 2 و6 سنتمترات على نطاق العالم. وإذا كانت هناك حاجة إلى دقة أكبر، فإنه يمكن استخدام قياسات محلية متوافقة للضغط الكامل للهواء وضغط بخار الماء كمدخل للنموذج.

الشـــكل 1

خريطتان تظهران متوسط زيادة تأخر انتشار المسير عن المستوى المرجعي في شهري يناير ويوليو



الملاحظة 1 – تتوفر الإجراءات Maltab التي تنطبق على النموذج الذي تصفه مجموعة معطيات المعادلات من (22) إلى (24) في موقع قطاع الاتصالات الراديوية الإلكتروني المعني بأعمال لجنة الدراسات 3 للاتصالات الراديوية.

0834-01

7 الانتشار عبر المجاري

هناك مجارٍ كلما كان التدرج العمودي للانكسارية عند ارتفاع وموقع معينين أصغر من –157 N/km.

إن وجود المجاري مهم لأنه يمكن أن يسبب انتشاراً راديوياً غير عادي، خاصة على وصلات أرض أو وصلات أرض–فضاء مع زاوية ارتفاع ضعيفة جداً. تشكل المجاري آلية تسمح للإشارات الراديوية ذات ترددات عالية بما يكفي بالانتشار بعيداً جداً ما وراء مسافة خط البصر العادية، ومن ثم خطر التداخل مع خدمات أخرى (انظر التوصية ITU-R P.452). وهي تلعب فيما عدا ذلك دوراً مهماً في ظواهر التداخل عبر مسيرات متعددة (انظر التوصية ITU-R P.530) ولو كان وجودها لا يكفي أو غير كافٍ لملاحظة ظواهر الانتشار عبر مسيرات متعددة على وصلة معينة.

1.7 تأثير زاوية الارتفاع

عندما يكون هوائي إرسال يقع داخل مجرى راديوي ذي طبقات أفقية، فإن الأشعة المرسلة عند زوايا ارتفاع ضعيفة جداً يمكن أن "تُحبس" داخل المجرى. في الحالة المبسطة لمظهر جانبي انكساري "عادي" فوق مجرى سطحي ذي تدرج انكسار ثابت، فإن زاوية الارتفاع الحرجة α (rad) لكي تُحبس الأشعة، تُعطى بواسطة المعادلة:

$$\alpha = \sqrt{2 \times 10^{-6} \left| \frac{\mathrm{d}M}{\mathrm{d}h} \right| \Delta h} \tag{25}$$

حيث $dM/\mathrm{d}h$ هي التدرج العمودي للانكسارية المعدّلة $\left(\frac{\mathrm{d}M}{\mathrm{d}h} < 0 \right)$ وΔh هي سُمك المجرى الذي يقابل ارتفاع ذروة المجرى فوق هوائي الإرسال.

يعطي الشكل 2 زاوية الارتفاع القصوى لكي "تُحبس" أشعة في المجرى. وترتفع زاوية "الحبس" القصوى بسرعة مع مرور تدرجات الانكسارية تحت –157 N/km (أي عندما ترتفع معدلات التغير) أو عندما يزيد سمك المجرى.

2.7 أدنى تردد "للحبس"

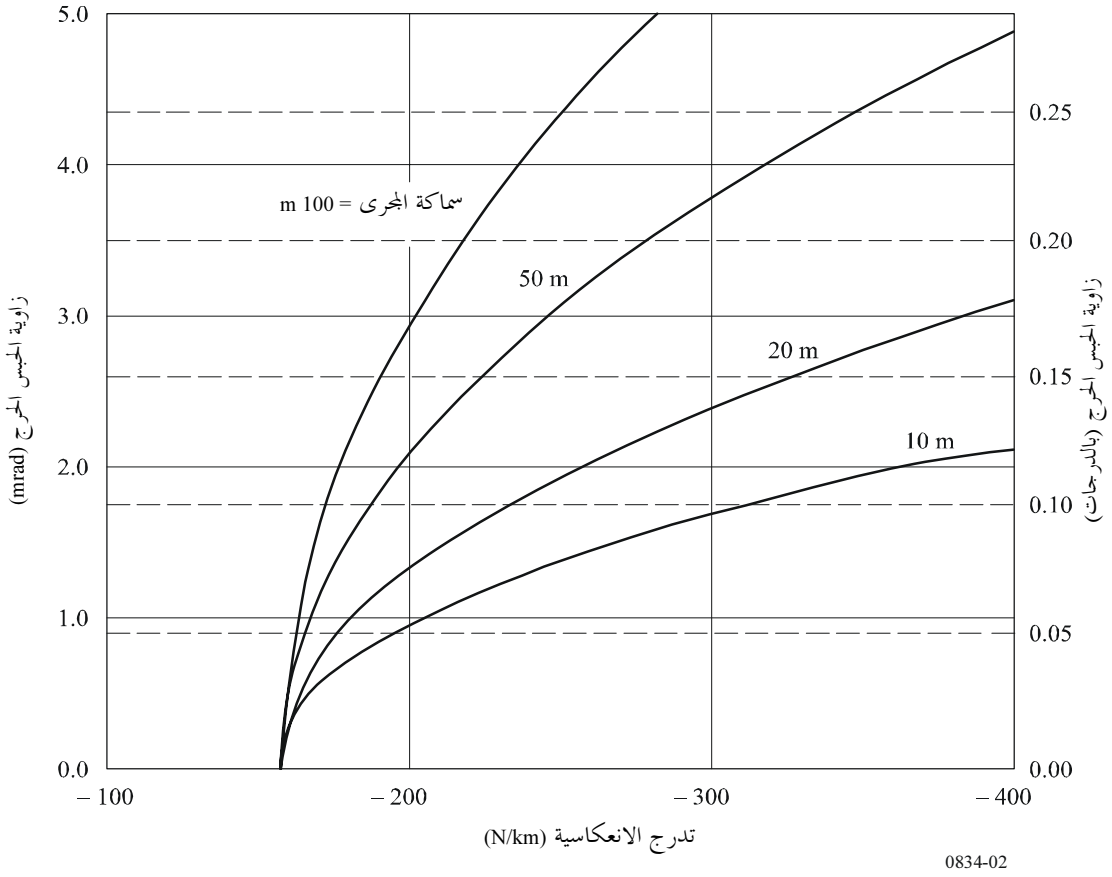
إن وجود مجرى، وإن كان في موقع جيد، لا يعني بالضرورة أن الطاقة ستُقترن بفعالية في المجرى بحيث يكون هناك انتشار على مسافات طويلة. وإضافة إلى ضرورة أن يراعي تردد الموجة زاوية الارتفاع القصوى، فإنه يجب أن يكون أعلى من قيمة حرجة محددة بواسطة العمق المادي للمجرى والمظهر الجانبي للانكسارية. وتحت هذا التردد الأدنى للحبس تكون هناك تسربات متزايدة للطاقة عبر حدود المجرى.

من الممكن تقييم التردد الأدنى لكي تُحبس موجة في مجرى تروبوسفيري باستعمال تكامل للطور. ويبين الشكل 3 تردد الحبس الأدنى لمجار سطحية (المنحنيات المتصلة) حيث يتم افتراض أن تدرج انكسارية ثابت (سالب) يمتد من السطح إلى ارتفاع معين، مع مظهر جانبي "معياري" فوق هذا الارتفاع. بالنسبة للترددات المستعملة مع أنظمة الأرض (على العموم بين 8 و16 GHz)، يجب أن يكون للمجرى سمك أدنى بين حوالي 5 و15 m وتردد الحبس الأدنى، f_{min}، يتوقف كثيراً على سُمك المجرى وتدرج مؤشر الانكسار.

وفي حالة المجاري المرفوعة، تدخل في الاعتبار معلمة أخرى، حتى بالنسبة للحالة البسيطة المتعلقة بمظهر جانبي خطي للانكسارية. تأخذ هذه المعلمة في الاعتبار شكل المظهر الجانبي لمؤشر الانكسار تحت تدرج المجرى. تدل المنحنيات المتقطعة في الشكل 3 على تردد الحبس الأدنى لمجرى ذي تدرج ثابت يقع فوق طبقة سطحية ذات تدرج انكسارية معيارية لا يقل عن –40 N/km.

الشـــكل 2

الزاوية القصوى للحبس لمجرى سطحي له تدرج انكسارية ثابت فوق أرض كروية



وبالنسبة لطبقات لها معدلات تغير أعلى بقدر بسيط من الحد الأدنى المطلوب لوجود انتشار عبر المجرى، يكون تردد الحبس الأدنى في الواقع أعلى من التردد الملاحظ في حالة مجرى سطحي. وبالنسبة لتدرجات مجرى مهمة جداً، وحتى يكون هناك حبس في المجرى المرفوع، لا بد من طبقة أرق بكثير مما هو الحال في المجرى السطحي لتدرج مكافئ بالنسبة لأي تردد.

الشـــكل 3

التردد الأدنى للحبس في مجار راديوية جوية
لتدرجات الانكسارية الثابتة